

수소의 누출 및 폭발의 위험성평가과정에서 고려사항

김 종 수

한국과학기술연구원, 환경공정연구부

Some Considerations for Consequence analysis of Chemical Accidents Involving Hydrogen

Jong Soo Kim

Korea Institute of Science and Technology, Environment and Process Technology Division

1. 서론

가연성물질의 누출로 인해서 발생하는 사고의 많은 경우에서, 증기운 폭발이 최악의 사고시나리오로 설정된다. 이러한 이유는 증기운폭발이 발생하면, 누출된 가연성가스가 보유하고 있는 총에너지의 약 10%에 해당하는 매우 큰 에너지가 매우 짧은 시간에 대기로 방출되어 막대한 물리적 피해를 입힐 수 있기 때문이다. 이러한 관점에서 수소에너지시스템에서 발생할 수 있는 증기운폭발사고에 대해서도 각별한 주의가 요구되고 있는 실정이다. 수소는 단위질량당 가장 큰 화학 에너지를 보유하고 있으며, 매우 높은 산화반응특성 때문에 가장 넓은 가연혼합 범위 (체적비 4~75%)를 갖고 있어 가연성 증기운이 형성된다면, 언제든지 강력한 증기운폭발로 전환될 가능성이 충분하기 때문이다.

수소의 증기운폭발에 따른 위험성을 적절히 관리하기 위해서는 (1) 각 요소공정에 대한 위험성분석 및 (2) 발생한 사고에 대한 위험성평가가 수행되어야 한다. 특히 수소의 증기운폭발은 강력한 연소현상에 의해서 특성이 좌우되므로, 사고의 결과에 대한 위험성평가에 각별한 주의가 요구된다.

증기운폭발의 위험성을 평가하기 위한 방법론을 소개한 서적이 많이 있으나, 이 가운데에서 가장 유용한 자료는 AIChE 산하 CCPS (Center for Chemical Process Safety)에서 발간한 "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs" 를 들 수 있을 것이다 [1]. 누출된 가연성가스의 연소와 관련된 다양한 사고시나리오에 대한 결과해석방법을 제시하고 있으며, 또한 관련분야의 최신 연구동향에 대한 자료도 제공하고 있다. 그러나 이와 같이 잘 정리된 자료를 활용한 사고의 결과해석 (Consequence Analysis)이 항상 성공적으로 수행되지 못하고 있는 것이 현재의 실정이다. 안전공학은 화학공학 및 기계공학 등 1차 공학에서 파생된 학문으로서, 관련분야의 전문가들이 증기운폭발과정에 관여된 다양한 물리-화학적 현상에 대한 직접적인 지식을 습득하지 못한 경우가 있어서, 잘못된 위험성평가 결과를 제시하는 경우가 자주 발생하고 있다. 특히 수소와 같이 확산 및 연소특성이 일반적인 가연성 물질과 매우 다른 경우에 위험성평가 과정에서 오류가 발생할 가능성이 매우 높은 실정이다. 여기에서는 수소의 증기운폭발 및 화재사고의 결과해석에서 발생할

수 있는 기술적 오류를 발생시킬 수 있는 부분에 대해서 올바른 결과해석을 위한 방법론을 제시하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 누출수소의 확산예측

증기운폭발사고의 위험성평가의 첫 단계는 누출된 가연성물질의 확산예측이다. 특히 수소는 화학적 위해성이 없는 물질이므로 확산예측의 목적은 전적으로 가연성 증기운이 형성되는 과정을 예측하여 증기운폭발에 참가할 수 있는 가연성 예혼합기의 양을 예측하는데 맞춰져 있다. 이러한 관점에서 요구되는 예측농도는 수소의 저위가연한계에 해당하는 체적분률 4%를 정확히 예측할 수 있는 수준의 정확성을 요구하게 되며, 따라서 ppm 단위의 예측을 위한 장거리 장시간 확산모사는 필요하지 않다.

수소의 확산과정에서는 %단위의 높은 농도에 해당하는 혼합 및 확산에 대한 예측을 실시하므로, 기존의 독성물질의 확산예측과 매우 다른 특성길이 및 밀도의 영향을 보이게 된다. 일반적인 독성가스는 누출원에서 멀어질 경우, 주변공기에 충분히 희석되어 대기의 유동 및 난류에 의한 피동적 이류 및 확산이 발생하여 피해영역을 넓히게 된다. 특히 누출원에서 충분히 멀리 떨어진 독성가스의 Plume 또는 Puff에 대한 특성길이는 주변 지형지물의 특성길이보다 매우 큰 경우가 일반적이다. 이러한 경우에는 평형난류에 대해서 적용할 수 있는 Gaussian 확산모델을 적용하는 것이 가능하며, 주변의 지형의 불균일성이나 건물의 영향은 표면거칠기 (Surface Roughness)로 표현되어 대기의 난류강도에 영향을 미쳐 확산을 제어하는 효과를 보이게 된다. 이와 같은 독성물질의 Gaussian 확산모델은 예측에 소요되는 시간이 매우 짧기 때문에, 독성가스 누출사고의 비상대응에 필요한 정보를 현장에서 바로 알려줄 수 있는 비상대응정보시스템으로 활용되고 있으며, 대표적인 예가 미국의 NOAA 및 EPA에서 제공하고 있는 ALOHA이다 [2].

그러나 고농도의 누출수소에 대한 예측만 필요한 수소의 증기운 폭발에서는 공농도의 수소가 발견될 수 있는 영역의 크기가 매우 한정되어 있으므로, 누출수소 증기운의 특성거리가 결코 주변 건물 및 지형지물의 특성길이와 비교하여 커다란 차이를 보이지 않을 것이다. 특히 누출원에서 비교적 가까운 고농도지역에서는 수소의 밀도에 의해서 누출된 수소는 아래의 그림 1과 같이 부양확산 (기체누출인 경우) 되거나 [3], 그림 2와 같이 침강확산 (액체누출인 경우)의 과정을 거치게 된다 [4]. 따라서 누출된 수소의 확산을 예측하기 위해서는 누출원 주변 시설물의 배치가 고려된 3차원적 확산예측이 수행되어야 하며, 또한 밀도의 차이에서 기인하는 부양확산 또는 침강확산의 효과도 고려되어야 한다.

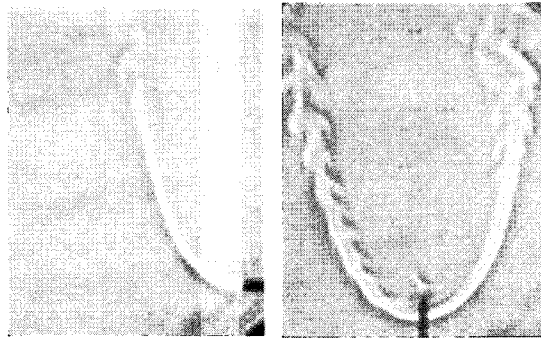


그림 121. 누출된 수소제트의 부양확산 가시화사진. (좌) 수소제트의 부양확산궤적 및 (우) 벽면과 충돌한 수소제트가 부양확산되면서 퍼지는 모습[3]

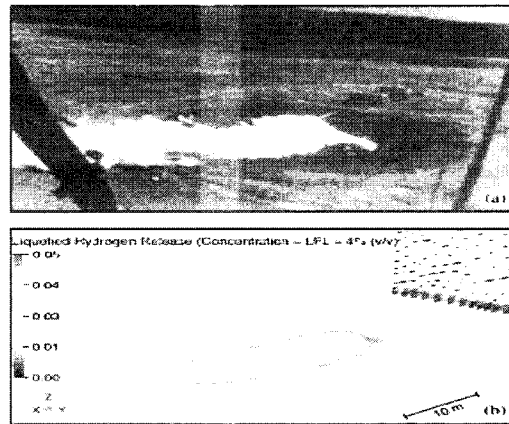


그림 122. 액체수소누출의 침강확산 실험 및 수치해석결과의 제시[4]

앞에서 설명되었듯이, 수소의 증기운 형성과정을 예측하기 위한 확산예측은 근본적으로 3차원 해석을 통해서 수행되어야 한다. 따라서 구체적인 3차원 해석의 방법론에 대해서도 고찰해볼 필요가 있다. 3차원 확산모사를 위해서는 먼저 유한차분법을 이용한 Eulerian 확산예측방법이 고려될 수 있다. 그러나 이러한 방법론에는 유한차분법을 수행하기 위한 격자계와 관련된 다양한 문제점이 발생하고 있다. 비록 수소증기운의 특성길이가 전체 계산영역과 비슷할지라도 실제 수소증기운이 차지하고 있는 체적은 전체계산영역의 체적에 극히 일부분이며, 또한 수소증기운의 형태가 지속적으로 변화하고 있으므로 시간대마다 변화하는 증기운에 적합한 격자계를 생성시키는 것이 기술적으로 매우 어렵다. 또한 증기운 주변의 상세한 격자계로 인해서 상당한 계산시간이 소요되게 된다. 따라서 일반적인 Eulerian 확산예측방법을 채택하는 수소의 확산예측은 발생한 사고의 재구성이나 [5] 상세한 위험관리계획을 작성하기 위한 특수한 목적에만 적용될 수 있는

한계가 있다.

한편 Eulerian 확산예측방법의 대안으로 Lagrangian 확산예측방법이 고려될 수 있다. 이창훈 등은 부양확산 또는 침강확산되는 증기운에 대한 Lagrangian 입자모사기법을 개발하여 아래의 그림 3과 같이 적용한 바가 있으며 [6], 이러한 Lagrangian 확산모사기법은 증기운에 대한 격자계를 생성할 필요가 없이 계산에 사용되는 입자의 수를 조절하기 때문에, 대용량의 계산이 필요한 확산모사의 경우 보다 범용적 이용이 가능한 확산모사기법으로 개발하기에 유리한 장점이 있다. 현재는 군사용과 같이 특수한 독성가스 확산예측에 적용되고 있으나, 추가적인 개발을 통해서 3차원적인 확산예측에도 적용이 가능할 것으로 예상할 수 있다.

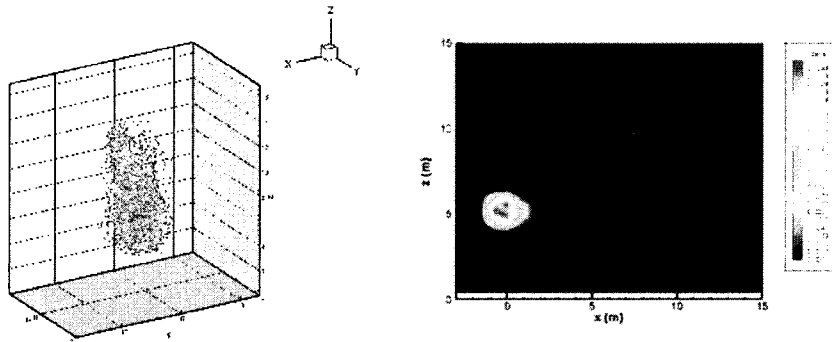


그림 123 불안정한 대기에서 확산되는 수소 Puff의 Lagrangian 수치모사

수소증기운의 형성과 관련하여 또 다른 중요인자는 점화지연시간이다. 즉, 누출 시작에서부터 점화되는 시점이 증기운형성을 위한 확산이 진행되는 시간인 것이다. 점화지연시간이 매우 짧으면 충분한 증기운을 형성할 수 없으므로, 연소는 소량의 예혼합 증기운에 대한 Flash Fire로 진행된다, 나머지 수소에 대한 확산 화염의 형태로 종료될 것이다. 충분한 점화지연시간이 확보되면 강력한 증기운폭발을 발생시킬 수 있는 증기운 형성을 위한 확산이 가능하며, 또한 점화시간이 너무 길면 주변공기의 충분한 유입에 의해서 혼합기의 수소농도가 너무 낮아져 폭발의 위력이 감소하거나 발생하지 않을 수도 있다. 최대의 폭발위력을 발생시킬 수 있는 점화지연시간을 정확히 예측하기는 어렵겠지만 대체적으로 고려되는 증기운크기에 대한 난류확산시간의 차수를 갖는다는 것은 예상할 수 있다. 따라서 이보다 작거나 큰 점화지연시간에 대해서는 비교적 약한 증기운폭발을 예상할 수 있을 것이다.

3. 수소증기운의 폭발과정

수소가 누출되어 확산 및 혼합되면서 형성된 충분한 크기의 가연성 예혼합 증기운이 점화되면 증기운 폭발로 이어질 수 있다. 증기운이 점화되었다면, 우리의 관심은 증기운 폭발의 위력에 모아져야 된다. 증기운의 폭발위력은 증기운 안에

서 진행되는 예혼합화염의 전파속도와 깊은 연관이 있다. 일반적으로 폭발과정의 음속은 약 1000m/sec이며, 이러한 조건에서 충분한 폭풍압이 형성되기 위해서는 화염의 전파속도가 약 100m/sec 이상의 속도로 전파되어야만 충분한 압축성 효과를 발휘하기 시작할 수 있다. 그러나 일반적인 화염의 층류전파속도는 약 1m/sec의 차수이므로, 여러 가지 가속화 메커니즘이 작동하지 않는다면 화염전파의 Mach 수가 너무 작아서 충분한 위력을 갖고 있는 폭풍압을 발생시킬 수 없게 된다.

증기운 폭발과정에서 화염의 전파되는 양상은 크게 deflagration과 detonation으로 구분될 수 있다. 전자는 음속이하의 속도로 압력의 변화가 거의 없이 전파되는 반면, 후자는 약 2km/sec의 빠른 속도로 전파되면서 약 20기압정도의 충격파를 동반하는 화염전파의 형태로서 일반적인 정적연소기에서보다 높은 압력이 발생하여 가장 많은 피해를 유발할 수 있는 폭발의 형태이다. 이와 같이 다른 폭발의 양상은 (1) 점화에너지 및 (2) 화염의 가속화정도 등에 의해서 결정된다. 먼저 점화에너지는 연소가 deflagration으로 시작되는지 아니면 detonation으로 시작되는지를 결정한다. 한편 deflagration으로 시작된 폭발현상은 주변 지형지물 및 장애물과의 상호작용에 의해서 화염이 가속화되며, 가속화의 정도에 따라서 (1) flash fire, (2) 일반적인 증기운 폭발 (매우 빠른 난류화염전파) 및 (3) DDT (Deflagration to Detonation Transition)에 의한 detonation 으로 구분될 수 있다. 이와 같은 다양한 형태의 증기운 폭발을 결정할 수 있는 flow chart가 아래의 그림 4에 도시되어 있다.

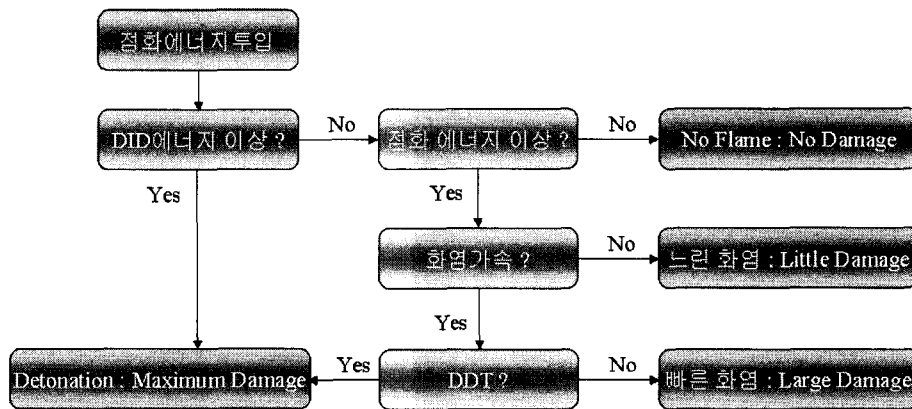


그림 124 증기운 폭발의 형태에 대한 결정 흐름도

그림 여기에서는 증기운폭발의 형태를 결정하는 점화에너지, 화염가속 및 DDT (화염가속의 극단적인 형태)에 대한 구체적인 물리적 현상을 알아보기로 하자. 대부분의 공기 예혼합기에 대한 최소점화에너지가 1mJ 내외의 매우 작은 값인 반면, 바로 detonation을 발생시킬 수 있는 DID (Direct Initiation of Detonation)은 최소점화에너지의 약 10^{10} 배에 해당하는 에너지가 소요되게 된다. 즉, 일반 화염은 화염의 연쇄반응을 유지시킬 수 있는 작은 에너지에 의해서 점화하는 것이 가능하지만, Detonation은 혼합기의 일정부분을 Detonation wave

의 von Neuman Spike 조건에 해당하는 고온 고압까지 급속도로 압축할 수 있는 에너지를 요구하므로 상대적으로 매우 큰 점화에너지가 필요하게 된다 [7]. 따라서 의도적인 목적에 의해서 폭굉을 발생시키기 위한 뇌관을 사용하지 않는다면, 일반적인 사고의 상황에서는 가연성 증기운에서 직접적으로 폭굉이 발생할 가능성은 매우 낮은 편이다. 따라서 deflagration wave가 난류예혼합화염의 형태로 전파하는 경우가 증기운폭발과정의 일반적인 연소형태이다.

점화되어 deflagration 형태로 전파하는 증기운 폭발의 특성은 이제 화염의 가속화에 의해서 위력이 결정되게 된다. 증기운 안의 예혼합화염의 전파는 다음과 같은 다양한 방법에 의해서 가속화될 수 있다. (1) 고유불안정성에 의한 화염면의 증가 (2) Taylor 불안정성과 같은 주변 장애물과 상호작용에 의한 급격한 난류화염면 증가 및 (3) 압력파와의 상호작용에 의한 난류화염면 증가이다. 즉, 층류화염전파속도가 1m/sec 내외의 매우 낮은 속도이므로 강력한 난류화 메커니즘에 의한 화염의 가속화가 진행되어야 한다. 먼저 수소는 다른 화염보다 층류화염전파속도가 빠르기 때문에 밀도차에 의한 Landau Instability 및 확산도의 차이에 의한 Turing Instability에 의해서 화염의 자기 난류화 (self-turbulization) 되는 경향이 강하다[7]. 따라서 수소의 증기운 폭발이 동일한 조건의 다른 연료보다 높은 폭발위력을 나타내게 된다[1].

그러나 보다 중요한 난류화 메커니즘은 화염이 좁은 공간을 통과하는 과정에서 발생하는 Taylor 불안정성이다. 화염이 좁은 공간을 통과하면서 일시적으로 가속화되는 과정에서 화염면 전후의 밀도차와 화염의 가속도장의 상호작용에 의해서 화염면이 불안정해져서 화염면의 급격한 fingering 현상이 발생한다 [8]. 이러한 fingering에 의해서 화염면은 여러 차수이상 증가할 수 있으며 결과적으로 100m/sec이상의 난류화염전파속도를 얻을 수 있다. 이와 같은 Taylor 불안정성이 화염전파경로상에 있는 장애물을 반복적으로 통과하는 과정에서 화염면의 난류화를 촉진하게 되며, 따라서 증기운폭발의 위력을 증가시킬 수 있다. 결과적으로 비교적 자유로운 화염의 전파가 가능한 개방공간과 비교하여, 화염전파 경로상에 다양한 장애물이 존재하는 복잡한 폐쇄공간에서 증기운의 폭발의 위력이 훨씬 클 것임을 알 수 있다. 화염가속화의 또 다른 원인은 화염에서 발생된 압력파의 반사파와 화염의 상호작용에 의한 난류화이다. 화염면에서 발생된 압력파는 주변의 지형지물에 의해서 매우 불규칙하게 반사되며, 반사된 압력파가 화염면에 도달한 경우 화학반응률에 영향을 미쳐서 불균일한 화염전파속도에 의한 화염면의 난류화를 촉진시켜 화염전파속도를 증가시킬 수 있다. 이와 같이 다양한 화염의 가속화가 발생할 경우, 대부분의 증기운 폭발에서는 약 1~2기압정도의 폭풍압을 발생시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 개방공간과 같이 화염의 가속에 불리한 조건에서는 충분한 폭풍압을 동반하지 않는 flash fire의 형태로 폭발이 진행될 가능성도 충분히 고려되어야 한다.

압력파에 의한 화염가속의 매우 특이한 형태가 Deflagration에서 Detonation으로 천이가 발생하는 DDT이다. DDT는 화염전파, 충격파 및 경계조건과의 복잡한 상호작용이 필요한 현상이므로 DDT에 대한 일반적인 이론은 확립되지 않았으나, DDT 현상의 쉬운 이해를 위해서 DDT가 발생하는 과정을 매우 잘 보여주고 있는 수치해석결과를 다음의 그림 5에 제시하였다 [9]. 아래의 그림은 매우 긴 형태의 관에서 발생하는 DDT를 수치모사한 결과로서 각 시간별 밀도를

보여주고 있다. 0.13ms의 상황에서 좌측에 위치한 분리막의 파열에 의한 압축파 (I)가 우측으로 전파되기 시작하며, 중앙에는 점화된 화염 (F)이 좌우로 전파되는 것을 보여준다. 우측으로 전파되는 압축파는 0.57ms 이후 벽면에서 반사되어 반사파 (R2)를 형성하게 되며 반사파 (R2)의 뒷면에는 고온고압지역이 형성되게 된다. 0.82ms에서는 고온고압지역에서 발생한 자발화에 의해서 detonation (D1)이 발생하는 것을 보여주고 있으며 0.86ms에서 화염면 (FB)과 D1의 결합에 의한 본격적인 detonation D2가 발생한 것을 보여주고 있다. 즉, 초기의 압축파 (I)와 화염 (F)가 복잡한 과정을 통해서 detonation D2로 천이되는 과정을 보여준 것이다.

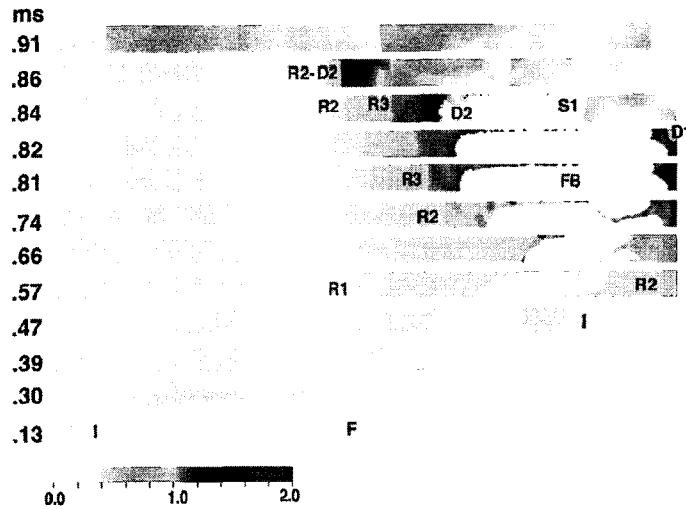


그림 125. DDT 발생의 예[9]

이와 같이 DDT는 화염면과 충격파의 결합에 의해서 발생하는 것을 알 수 있으며, 충분한 강도의 1차원적인 충격파를 형성시킬 수 있기 위해서는, 충격파의 감쇄를 방지할 수 있는 비교적 1차원적 전파특성이 강한 갱도와 같은 지형조건에서 용이할 것이다. 따라서 비교적 긴 수소관로에 공기가 침투하는 경우와 같이 1차원적 전파가 가정되지 않는 경우에는 detonation을 수소누출의 증기운 폭발의 형태로 가정하기는 쉽지 않은 실정이다. 한편 구체적인 수소증기운의 폭발위력을 예측하는 것은 아직 많은 연구가 필요한 상태이다. 수소는 다른 화염보다 전파속도가 빠르므로 잠재적으로 높은 폭발수율을 예측할 수 있다. 이러한 관점에서 천연가스의 폭발수율을 약 5%정도로 설정한 반면 수소의 폭발수율은 약 10~20%까지 상향조정하는 경향이 있다. 또한 detonation이 발생하는 경우에는 최고 30~40%까지의 폭발수율을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 결과는 비교적 구형의 대칭적인 증기운에 대한 경우에 대한 실험 및 이론해석을 통해서 얻은 결과이나, 수소는 부양확산에 의해서 폐쇄공간의 상층부에 넓은 퍼진 형태의 증기운을 형성할 가능성이 매우 농후하다. 이와 같이 비구형의 증기운에 대한 폭발수율에 대해서는 아직 충분한 연구결과가 축적되지 못했기 때문에 실험적 또는 수치적 모사를 통해서 폭발에서 발생하는 폭풍압의 특성을 파악할 수밖에 없는 실정이다.

4. 결론

본 논문에서는 수소의 누출에 의해서 발생하는 증기운폭발의 위험성평가를 실시하는 과정에서 자주 발생하는 오류에 대해서 지적하고 올바른 위험성평가를 위한 방법론을 활용하기 위한 주의점을 짚어보았다.

수소는 매우 가연성이 높은 기체이지만, 증기운의 축적이 어렵기 때문에 일반인이 생각하는 것보다는 위험하지 않은 연료일 수 있다. 그럼에도 불구하고 전문가집단에서 발생하는 기술적 판단의 오류는 수소의 안전성 및 수소에너지시스템의 안전성에 대한 치명적인 결과를 초래할 수 있으므로, 전문가집단에서는 보다 정확한 과학적 근거에 입각한 위험성평가 및 안전관리를 실시해야만 할 것이다.

참고문헌

1. CCPS, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs*, AIChE, (1994)
2. US EPA & NOAA, *ALOHA* (1995)
3. 김종수, “수소가스 사고 및 위험성에 대한 안전관리기술 개발” 한국과학기술연구원 (2006).
4. Rigas, F. and Sklavounos, S., "Evaluation of hazard associated with hydrogen storage facilities," *Int. J. Hydrogen Energy* 30, 1501-1510, (2005)
5. Venetsanos, A.G., Huld, T., Adams, P. and Bartziz, J.G., "Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment," *J. Hazardous Materials* A105, 1-25, (2003)
6. 김병구, 이창훈, 김종수 “단순공간에서 부양성 기체의 확산을 예측하기 위한 라그랑지안 확률모델,” 한국수소 및 신에너지학회 2005 춘계학술대회 논문집, 73-78, (2005).
7. Williams, F.A., *Combustion Theory*, Benjamin-Cummings (1985).
8. Pelce, P., *Dynamics of Curved Fronts*, Academic Press (1988).
9. Khokholov, A. and Oran E.S., "Numerical simulation of detonation initiation in a flame brush: the role of hot spots," *Combustion and Flame* 119, 400-416, (1999).